

## **Commutateur micro-mécanique bistable, méthode d'actionnement et procédé de réalisation correspondant**

### **Domaine technique de l'invention**

L'invention concerne un commutateur micro-mécanique, comportant un pont suspendu déformable, rattaché par des moyens de support à un substrat, et des moyens d'actionnement destinés, à partir d'une première position stable du commutateur, à déformer le pont suspendu déformable de manière à établir un contact électrique entre au moins un premier élément conducteur formé sur le substrat, entre le pont et le substrat, et un deuxième élément conducteur, solidaire d'une face inférieure du pont.

### **État de la technique**

Comme représenté à la figure 1, un commutateur micro-mécanique comporte typiquement un pont 1 suspendu déformable rattaché par des moyens 2 de support à un substrat 3. Des actionneurs permettent de déformer le pont suspendu, de manière à établir un contact électrique entre des premiers éléments 5 conducteurs formés sur le substrat 3 et un deuxième élément 6 conducteur, solidaire d'une face inférieure du pont 1. Les actionneurs sont, par exemple, constitués par des électrodes 4a et 4b formées respectivement sur le pont 1 et sur le substrat 3 et entre lesquelles est appliquée une tension électrique de commande. Les premiers éléments 5 conducteurs sont, par exemple, constitués par deux tronçons d'une ligne radiofréquence qui sont reliés par le deuxième élément 6 conducteur. Lorsque les moyens d'actionnement 4 sont interrompus (annulation de la tension de commande), le pont 1 revient

dans son état non-déformé, c'est-à-dire sa position stable, et le contact électrique est interrompu. Afin de maintenir un contact électrique, il est alors nécessaire de continuer l'actionnement, ce qui peut augmenter la consommation électrique du commutateur. Par ailleurs, si on a un problème sur la commande (ou sur la tension), le contact électrique n'est plus assuré.

Au contraire, un interrupteur domestique classique a deux positions stables et le contact électrique reste respectivement établi ou interrompu sans apport d'énergie permanent. Cependant, il est compliqué de fabriquer un commutateur analogue, bistable, de taille microscopique.

Dans un commutateur bistable microscopique connu, un premier élément conducteur est constitué par une goutte de mercure, qui est déplacée par l'intermédiaire de forces électrostatiques pour établir ou interrompre un contact électrique entre deux éléments conducteurs solides. Cependant, d'une part, le mercure est très toxique et, d'autre part, la goutte se déplace au moindre mouvement du commutateur ce qui peut provoquer des commutations inopinées.

Le document US2002/191897 décrit un commutateur comportant une poutre de commutation reliée à ses extrémités par des supports fixés sur un substrat. Le commutateur présente une première position stable correspondant à une position ouverte du commutateur. Les poutres de commutation sont actionnées par des électrodes de commutation, de manière à déformer la poutre de commutation pour faire passer le commutateur dans une seconde position correspondant à la position fermée du commutateur. Pour maintenir le contact dans cette seconde position, il est nécessaire de maintenir les électrodes de commutation sous tension. Le commutateur comporte également des poutres de reconfiguration disposées à la périphérie de la poutre de commutation, d'un

seul côté de celle-ci ou de part et d'autre de celle-ci. Les poutres de reconfiguration sont fixées au substrat par l'intermédiaire de supports rigides. Le commutateur comporte également des éléments d'actionnement coopérant avec les poutres de reconfiguration et destinés à les déformer indépendamment de la poutre de commutation. Dans un premier cas, lorsque le commutateur est dans sa première position stable, la déformation de la poutre de reconfiguration entraîne une augmentation de la distance entre la poutre de commutation et l'électrode. Dans un second cas, la déformation des poutres de reconfiguration entraîne l'apparition de forces de rappel, à l'intérieur de la poutre de commutation, représentatives des constantes de ressort du commutateur. Ces moyens de reconfiguration (poutres de reconfiguration et éléments d'actionnement associés) permettent, uniquement dans la première position stable du commutateur, de configurer et d'ajuster la tension qui sera nécessaire à la commutation du commutateur. En effet, la tension de commutation dépend soit de la distance entre la poutre et l'électrode, soit de la valeur des forces de rappel engendrées par la déformation des poutres de reconfiguration.

### Objet de l'invention

L'invention a pour but de remédier à ces inconvénients et, en particulier, de réaliser un commutateur microscopique ayant deux positions mécaniquement stables.

Selon l'invention, ce but est atteint par les revendications annexées et, plus particulièrement, par le fait que les moyens de support sont constitués par deux pieds disposés entre le pont et le substrat de manière à subdiviser le pont transversalement en un segment médian disposé entre les pieds et deux segments périphériques faisant saillie vers l'extérieur et comportant des

extrémités libres, les moyens d'actionnement comportant des moyens d'actionnement périphériques et des moyens d'actionnement médians permettant de déformer, indépendamment, respectivement les segments périphériques et le segment médian perpendiculairement au substrat.

5

Selon une méthode d'actionnement d'un contact électrique d'un commutateur micro-mécanique selon l'invention, le commutateur étant dans la première position stable, dans une première phase, le segment médian et les segments périphériques sont simultanément fléchis en direction du substrat, par l'intermédiaire de leurs moyens d'actionnement respectifs, de manière à établir le contact électrique, ensuite, les moyens d'actionnement périphériques sont interrompus dans une deuxième phase, de manière à provoquer automatiquement l'écartement des segments périphériques par rapport au substrat, les moyens d'actionnement médians étant interrompus dans une troisième phase, le segment médian étant ainsi automatiquement maintenu en position fléchie, de manière à définir une seconde position stable du commutateur, dans laquelle le contact électrique reste établi.

10

15

20

L'invention a également pour but un procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon l'invention, caractérisé en ce que la fabrication du pont suspendu déformable sur le substrat comporte :

- le dépôt d'une couche sacrificielle périphérique sur le substrat, de chaque côté du premier élément conducteur,
- le dépôt d'au moins une couche isolante périphérique sur chaque couche sacrificielle périphérique, de manière à couvrir les faces avant et les faces latérales des deux couches sacrificielles périphériques pour former les segments périphériques et les pieds,
- le dépôt d'une couche sacrificielle médiane, entre les couches isolantes périphériques, venant en contact avec les faces latérales

25

adjacentes des deux couches isolantes périphériques et couvrant le premier élément conducteur,

- le dépôt, sur la couche sacrificielle médiane, d'une couche isolante médiane venant en contact avec chacune des faces avant des deux couches isolantes périphériques pour former le segment médian,
- la gravure des faces latérales périphériques des deux couches isolantes périphériques, de manière à délimiter les segments périphériques,
- l'enlèvement des couches sacrificielles.

### Description sommaire des dessins

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs et représentés aux dessins annexés, dans lesquels :

La figure 1 montre un commutateur micro-mécanique selon l'art antérieur.

Les figures 2 et 3 représentent deux modes de réalisation particuliers d'un commutateur micro-mécanique selon l'invention.

Les figures 4 à 7, d'une part, et 8 et 9, d'autre part, illustrent schématiquement respectivement les différentes phases de l'établissement et de l'interruption d'un contact électrique d'un commutateur micro-mécanique selon l'invention.

Les figures 10 à 15 illustrent un procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon l'invention.

La figure 16 représente une variante d'un commutateur micro-mécanique fabriqué selon le procédé de réalisation illustré aux figures 10 à 15.

## 5 Description de modes particuliers de réalisation

Le commutateur micro-mécanique représenté à la figure 2 comporte un pont 1 suspendu déformable, rattaché à un substrat 3 par deux pieds 7 disposés entre le pont 1 et le substrat 3 de manière à subdiviser le pont 1 transversalement en un segment médian 8 disposé entre les deux pieds 7, et deux segments périphériques 9 faisant saillie vers l'extérieur. Deux actionneurs électrostatiques 10 médians et deux actionneurs électrostatiques 11 périphériques permettent de déformer, indépendamment, respectivement le segment médian 8 et les segments périphériques 9 sensiblement perpendiculairement au substrat. Les actionneurs 10 et 11 sont constitués par des électrodes formées respectivement sur le substrat 3 et sur les segments médian 8 ou périphériques 9.

A partir de la première position stable, illustrée sur la figure 2, les actionneurs 10 et 11 permettent de déformer le pont 1 de manière à établir un contact électrique entre un premier élément 5 conducteur formé sur le substrat 3, entre le pont 1 et le substrat 3, et un deuxième élément 6 conducteur, solidaire de la face inférieure du pont 1.

A la figure 3, les actionneurs 10 périphériques sont également en position de repos et le commutateur est dans une première position stable. Tandis que sur la figure 2, le segment médian 8 et les segments périphériques 9 sont constitués par une couche unique, sur la figure 3, une première couche 13 courbe forme respectivement un pied 7 et le segment périphérique 9 associé, de manière à ce que les pieds 7 soient inclinés par rapport au substrat 3 et que les segments

périphériques 9 comportent des extrémités libres 15 inclinées à l'écart du substrat 3. A la figure 3, le segment médian 8 est constitué par une deuxième couche 14 courbe et comporte ainsi une partie centrale 12 légèrement surélevée. Les actionneurs 10 et 11 sont respectivement intégrés dans les segments médian et périphériques.

Le commutateur peut basculer de sa première position stable, correspondant à l'interruption du contact électrique (figures 2 et 3), à une seconde position stable, correspondant à un contact électrique établi. Les figures 4 à 7 illustrent schématiquement le passage de la première position stable à la seconde position stable. A la figure 4, le commutateur est représenté dans la première position stable, les actionneurs étant au repos, la partie centrale 12 du segment médian 8 étant surélevé et les segments périphériques 9 étant inclinés à l'écart du substrat 3. Des contraintes  $\sigma$  localisées au niveau des segments périphériques, représentées par des flèches horizontales sur les figures, exercent une force de compression sur le segment médian 8 dans son sens longitudinal et empêchent, ainsi, le segment médian de quitter sa position surélevée. Dans une première phase, représentée à la figure 5, le segment médian 8 et les segments périphériques 9 sont simultanément fléchis en direction du substrat 3, respectivement par l'intermédiaire des actionneurs médians 10 et périphériques 11. Ceci permet d'établir le contact électrique entre le premier élément 5 conducteur et le deuxième élément 6 conducteur. Pendant la première phase, l'actionnement des actionneurs périphériques 11 provoque des contraintes  $\sigma$  exerçant une force de tension sur le segment médian 8 dans son sens longitudinal (figure 5). Puis, les actionneurs périphériques 11 sont interrompus dans une deuxième phase, représentée à la figure 6. Ceci provoque automatiquement l'écartement des segments périphériques 9 par rapport au substrat 3 et, dans cette position finale de la deuxième phase, des

contraintes  $\sigma$  de compression sur le segment médian 8 dans son sens longitudinal (figure 6). Ensuite, les actionneurs médians 10 sont interrompus dans une troisième phase. Le segment médian 8 est alors automatiquement maintenu en position fléchie par des contraintes  $\sigma$  en compression effectuées par les segments périphériques 9, définissant ainsi une seconde position stable du commutateur, représentée à la figure 7, dans laquelle le contact électrique reste établi. Ainsi, les trois phases successives d'actionnement permettent de faire passer le commutateur de sa première position stable (figure 4) à sa seconde position stable (figure 7).

10

Les figures 8 et 9 illustrent le retour de la seconde position stable à la première position stable du commutateur. En effet, dans une quatrième phase, représentée à la figure 8, les segments périphériques 9 sont de nouveau fléchis en direction du substrat 3, par l'intermédiaire des actionneurs périphériques 11.

15

Une contrainte mécanique  $\sigma$  en tension s'exerce sur le segment médian 8 dans son sens longitudinal, écartant sa partie centrale 12 du substrat 3. Les actionneurs périphériques 11 sont ensuite interrompus dans une cinquième phase, représentée à la figure 9, pour ramener le commutateur dans sa première position stable, dans laquelle les segments périphériques 9 sont inclinés à l'écart du substrat 3.

20

Les segments périphériques 9 sont sensiblement dans la même position (à l'écart du substrat) dans les deux positions stables du commutateur (figures 4, 7 et 9) et ne changent de position que provisoirement (figures 5 et 8) lors de l'actionnement du commutateur.

25

Le commutateur ayant deux positions stables, la première position dans laquelle le contact électrique est interrompu, et la seconde position dans laquelle le

contact électrique est établi, seul le passage d'une position à l'autre consomme de l'énergie et le commutateur peut, après actionnement, rester dans chacune de ces positions sans apport d'énergie supplémentaire.

5 Les figures 10 à 15 illustrent un procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon l'invention. Pour des raisons de clarté, les étapes de la fabrication des électrodes constituant les actionneurs 10 et 11 ne sont pas représentées. La fabrication du pont 1 suspendu déformable sur le substrat 3 comporte alors au moins les étapes suivantes. Dans une première étape, 10 représentée à la figure 10, une couche sacrificielle 16 périphérique est déposée de chaque côté du premier élément 5 conducteur disposé sur le substrat 3. Puis, dans une deuxième étape représentée à la figure 11, au moins une couche isolante 17 périphérique, par exemple en nitrure de silicium, est déposée sur chaque couche sacrificielle 16 périphérique. Les couches isolantes 15 17 périphériques couvrent les faces avant et les faces latérales des deux couches sacrificielles 16 périphériques. Les faces latérales des couches isolantes 17 périphériques disposées vis-à-vis du premier élément 5 conducteur sont destinées à former les pieds 7 et les faces avant des couches isolantes 17 périphériques sont destinées à former les segments périphériques 9. Ensuite, 20 dans une troisième étape, représentée à la figure 12, une couche sacrificielle 18 médiane est déposée entre les couches isolantes 17 périphériques. Elle vient en contact avec les faces latérales adjacentes des deux couches isolantes 17 périphériques et couvre le premier élément 5 conducteur. La quatrième étape consiste à déposer sur la couche sacrificielle 18 médiane une couche isolante 25 19 médiane. Celle-ci vient en contact avec chacune des faces avant des deux couches isolantes 17 périphériques, qu'elle peut recouvrir partiellement, pour former le segment médian 8 (figure 13). Dans une cinquième étape (figure 14), une gravure des faces latérales périphériques des deux couches isolantes 17 périphériques permet ensuite de délimiter les segments périphériques, de

manière à ne conserver que les segment périphériques 9 et les pieds 7. Dans une sixième étape, les couches sacrificielles 16 et 18 sont enlevées (figure 15).

5 La couche isolante périphérique 17 peut être une couche apte à créer une contrainte en compression sur le segment médian 8 dans le sens longitudinal du segment médian 8 par un effet de couple mécanique au niveau des segments périphériques 9. Afin d'obtenir un effet de couple, la couche isolante périphérique 17 peut être déposée en utilisant un procédé fixant un état de contrainte de la couche isolante périphérique 17. Par un procédé de type "dépôt  
10 plasma bifréquence", par exemple, il est possible d'obtenir une seule couche qui présente un gradient de contraintes. Le niveau de contrainte souhaité peut être obtenu en adaptant l'épaisseur de la couche déposée. Il est également possible de déposer plusieurs couches isolantes 17 périphériques sur chaque couche sacrificielle 16 périphérique afin de réaliser un gradient de contraintes comprimant le segment médian 8 dans son sens longitudinal. Un empilement de  
15 deux couches peut, par exemple, être réalisé par une couche non-contrainte déposée sur une couche en compression, par une couche en tension déposée sur une couche non-contrainte ou par une couche en tension déposée sur une couche en compression. Un empilement de trois couches peut, par exemple,  
20 être constitué par deux couches en tension déposées sur une couche en compression ou par une couche en tension déposée sur une couche non-contrainte déposée, elle-même, sur une couche en compression. On obtient, ainsi, un effet de type ressort.

25 Dans un mode préférentiel de réalisation, représenté à la figure 16, la couche isolante 19 médiane recouvre les faces avant des couches isolantes 17 périphériques sur toute leur longueur, ce qui amplifie les contraintes entre les deux couches 17 et 19. Ainsi, après la suppression des couches sacrificielles, les extrémités libres 15 des segment périphériques 9 et la partie centrale 12 du

segment médian 8 se relèvent automatiquement à l'écart du substrat. Dans un mode de réalisation non-représenté, les électrodes des actionneurs électrostatiques 11 périphériques sont disposées respectivement entre chaque couche isolante 17 périphérique et la couche isolante 19 médiane associée.

5

Sur la figure 16, les couches isolantes 17 périphériques couvrent chacune une partie 20 de la face avant du substrat 3 disposée respectivement entre la face latérale d'une couche sacrificielle 16 périphérique et le premier élément 5 conducteur.

10

L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation particuliers représentés. En particulier, les actionneurs 10 et 11 peuvent être constitués par tout type d'actionneur à savoir par des actionneurs piézoélectriques, thermiques, magnétiques etc... Dans le cas d'actionneurs électrostatiques, les électrodes périphériques sont, de préférence, plus larges, par exemple d'un facteur trois, que les électrodes médianes, dans un plan parallèle au substrat 3, ce qui permet de réduire la tension de pilotage des actionneurs périphériques. Un commutateur selon l'invention peut être utilisé dans une matrice d'interrupteurs ou comme interrupteur simple. Un tel commutateur peut typiquement être utilisé dans des applications de télécommunication, en particulier pour des dispositifs radiofréquence, terrestres et spatiaux, dans des applications biomédicales, des relais, etc...

15

20

## Revendications

- 5 1. Commutateur micro-mécanique, comportant un pont (1) suspendu déformable, rattaché par des moyens de support (2) à un substrat (3), et des moyens d'actionnement (4) destinés, à partir d'une première position stable du commutateur, à déformer le pont (1) suspendu déformable de manière à établir un contact électrique entre au moins un premier élément (5) conducteur formé sur le substrat (3), entre le pont (1) et le substrat (3), et un deuxième élément (6) conducteur, solidaire d'une face inférieure du pont (1), commutateur caractérisé en ce que les moyens de support sont
- 10 constitués par deux pieds (7) disposés entre le pont (1) et le substrat (3) de manière à subdiviser le pont (1) transversalement en un segment médian (8) disposé entre les pieds (7) et deux segments périphériques (9) faisant saillie vers l'extérieur et comportant des extrémités libres (15), les moyens d'actionnement comportant des moyens d'actionnement périphériques (11) et des moyens d'actionnement médians (10) permettant de déformer, indépendamment, respectivement les segments périphériques (9) et le segment médian (8) perpendiculairement au substrat (3).
- 15 2. Commutateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le segment médian (8) comporte une partie centrale (12) surélevée dans la première position stable du commutateur.
- 20 3. Commutateur selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que les extrémités libres (15) sont inclinées à l'écart du substrat (3) en position de repos des moyens d'actionnement périphériques (11).
- 25 4. Commutateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les moyens d'actionnement sont constitués par des électrodes

formées respectivement sur le substrat (3) et sur les segments périphériques (9) et médian (8).

- 5 5. Commutateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les pieds (7) sont inclinés.
- 10 6. Méthode d'actionnement d'un contact électrique d'un commutateur micro-mécanique selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que, le commutateur étant dans la première position stable, dans une première phase, le segment médian (8) et les segments périphériques (9) sont simultanément fléchis en direction du substrat (3), par l'intermédiaire de leurs moyens d'actionnement (10, 11) respectifs, de manière à établir le contact électrique, ensuite, les moyens d'actionnement périphériques (11) sont interrompus dans une deuxième phase, de manière à provoquer automatiquement l'écartement des segments périphériques (9) par rapport au substrat (3), les moyens d'actionnement médians (10) étant interrompus dans une troisième phase, le segment médian (8) étant ainsi automatiquement maintenu en position fléchie, de manière à définir une seconde position stable du commutateur, dans laquelle le contact électrique
- 15 20 reste établi.
- 25 7. Méthode selon la revendication 6, caractérisée en ce que, le commutateur étant dans la seconde position stable, dans une quatrième phase, les segments périphériques (9) sont fléchis en direction du substrat (3), par l'intermédiaire des moyens d'actionnement périphériques (11), de manière à exercer une contrainte mécanique sur le segment médian (8) et à écarter sa partie centrale (12) du substrat (3), les moyens d'actionnement périphériques (11) étant interrompus dans une cinquième phase pour amener le commutateur dans sa première position stable.

8. Procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la fabrication du pont (1) suspendu déformable sur le substrat (3) comporte :

- 5       - le dépôt d'une couche sacrificielle (16) périphérique sur le substrat (3), de chaque côté du premier élément (5) conducteur,
- le dépôt d'au moins une couche isolante (17) périphérique sur chaque couche sacrificielle (16) périphérique, de manière à couvrir  
10       (16) périphériques pour former les segments périphériques (9) et les pieds (7),
- le dépôt d'une couche sacrificielle (18) médiane, entre les couches isolantes (17) périphériques, venant en contact avec les faces  
15       latérales adjacentes des deux couches isolantes (17) périphériques et couvrant le premier élément (5) conducteur,
- le dépôt, sur la couche sacrificielle (18) médiane, d'une couche isolante (19) médiane venant en contact avec chacune des faces  
20       avant des deux couches isolantes (17) périphériques pour former le segment médian (8),
- la gravure des faces latérales périphériques des deux couches isolantes (17) périphériques, de manière à délimiter les segments  
      périphériques (9),
- l'enlèvement des couches sacrificielles (16, 18).

25       9. Procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon la revendication 8, caractérisé en ce que la couche isolante (19) médiane est déposée au moins partiellement sur la face avant des couches isolantes (17) périphériques.

- 5      **10. Procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon l'une des revendications 8 et 9, caractérisé en ce que les couches isolantes (17) périphériques sont déposées chacune sur une partie (20) de la face avant du substrat (3) disposée respectivement entre la face latérale d'une des couches sacrificielles (16) périphériques et le premier élément (5) conducteur.**
- 10      **11. Procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon l'une quelconque des revendications 8 à 10, caractérisé en ce que le dépôt des couches isolantes (17) périphériques est effectué de manière à créer un gradient de contraintes dans les couches isolantes périphériques (17).**
- 15      **12. Procédé de réalisation d'un commutateur micro-mécanique selon la revendications 11, caractérisé en ce que le dépôt des couches isolantes (17) périphériques est effectué de manière à créer, une fois le segment médian (8) déposé, une contrainte en compression sur le segment médian (8) dans le sens longitudinal du segment médian (8).**

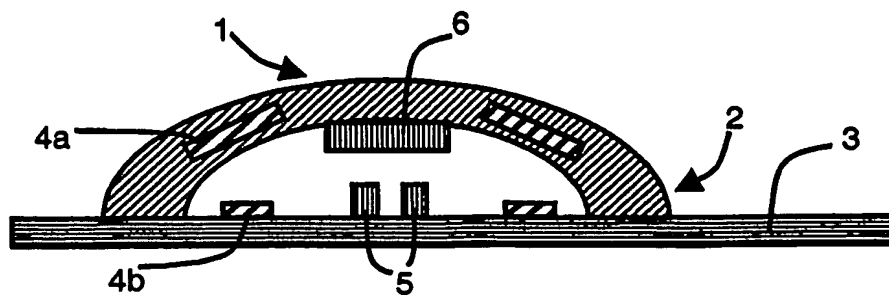


Figure 1 (Art antérieur)

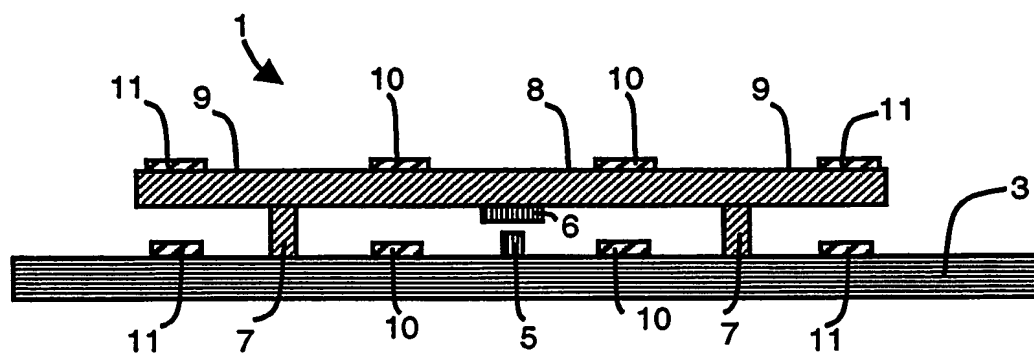


Figure 2

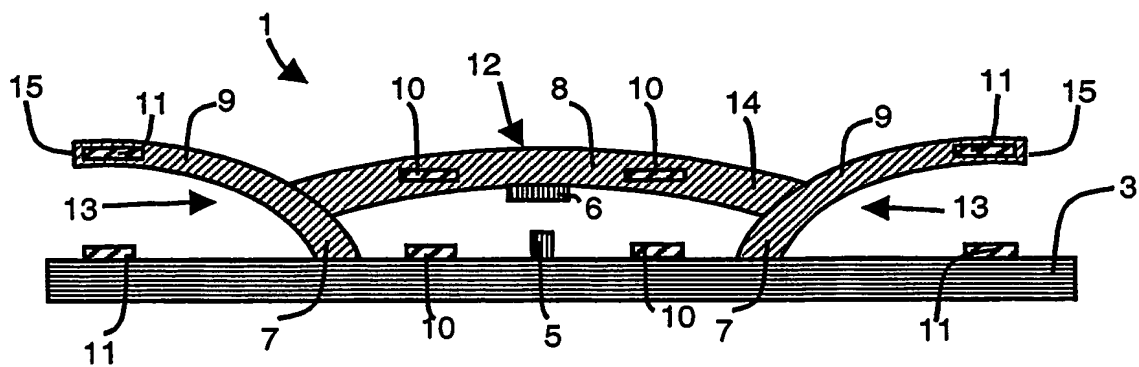


Figure 3

2/4

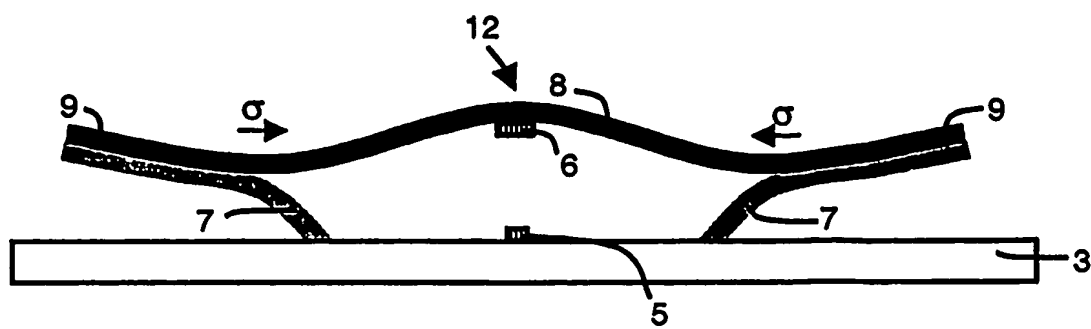


Figure 4

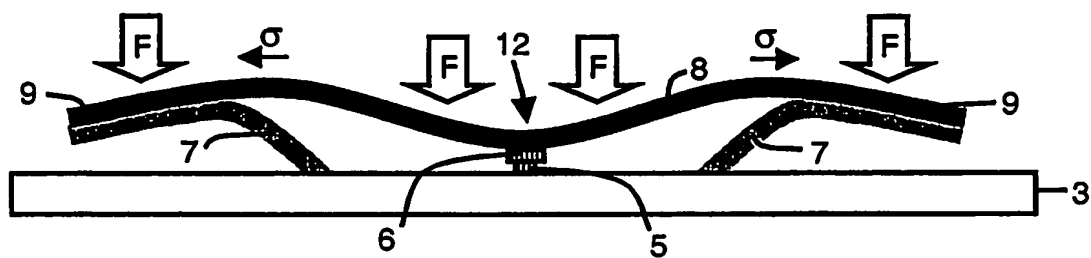


Figure 5

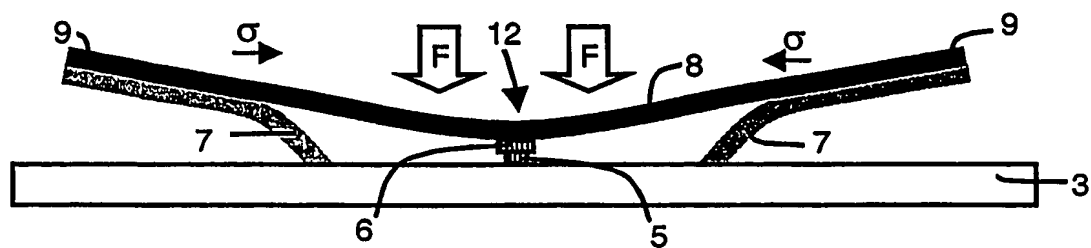


Figure 6

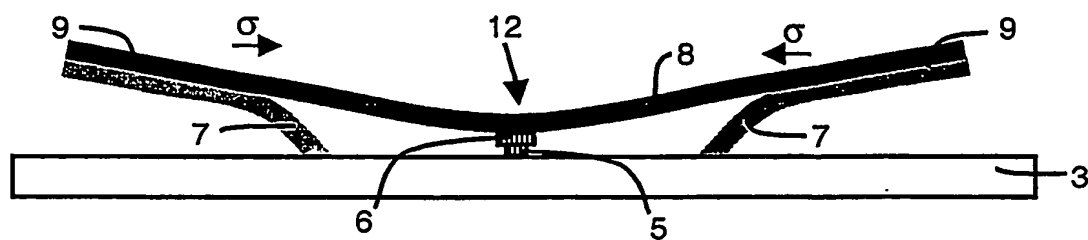


Figure 7

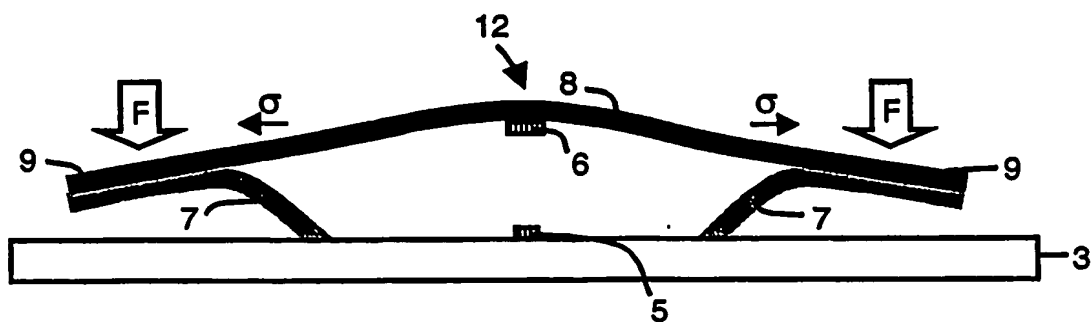


Figure 8

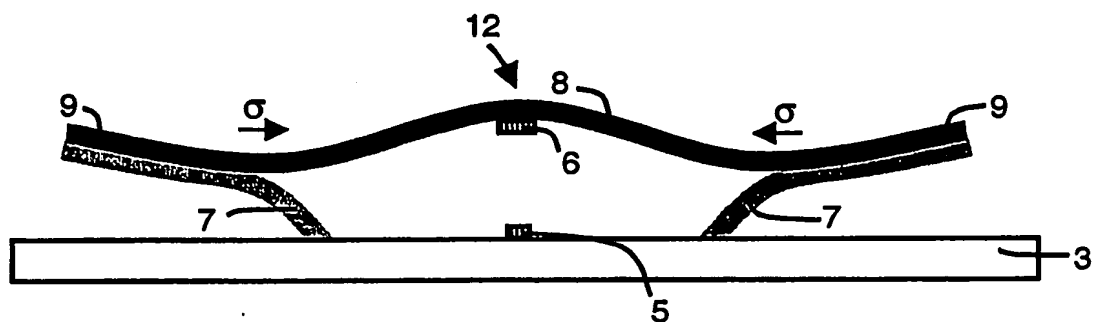


Figure 9

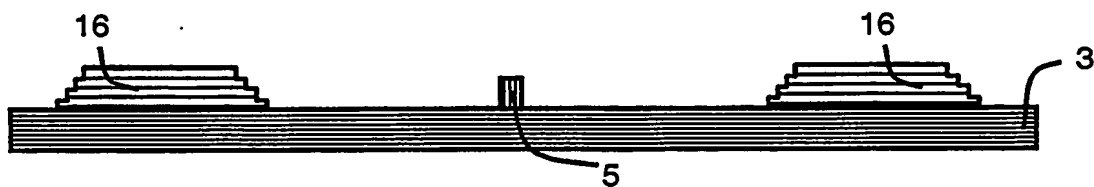


Figure 10

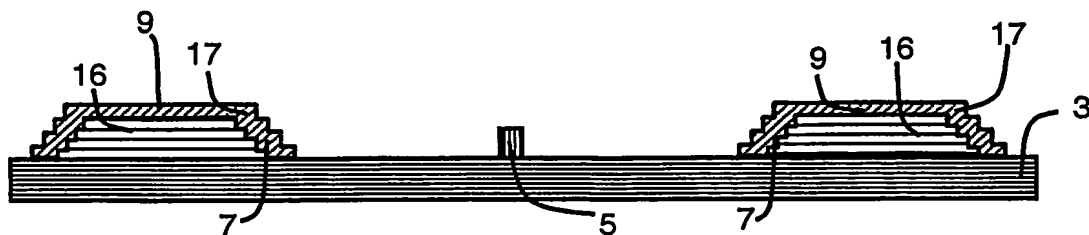


Figure 11

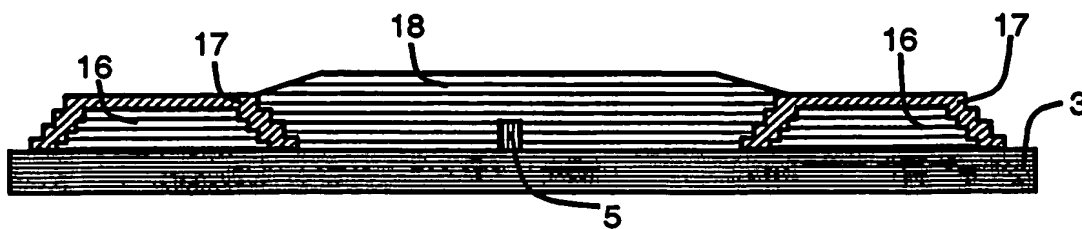


Figure 12

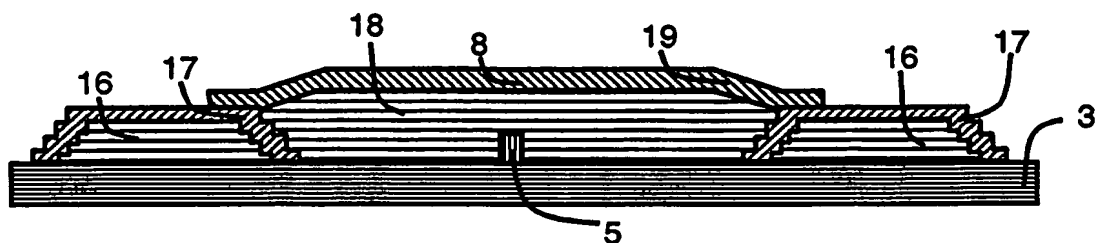


Figure 13

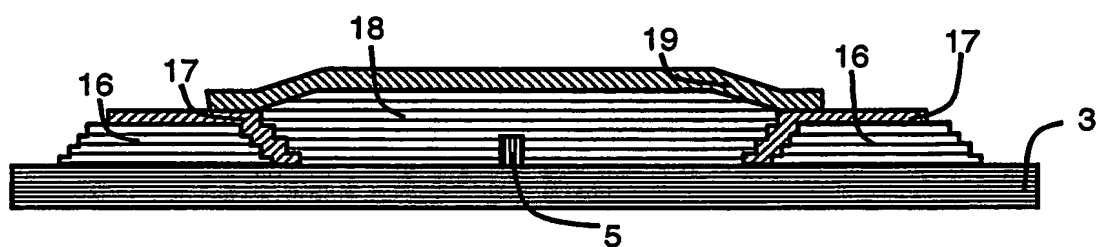


Figure 14

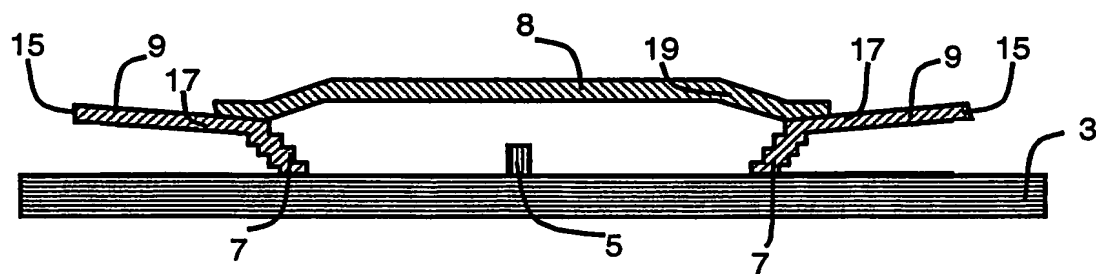


Figure 15

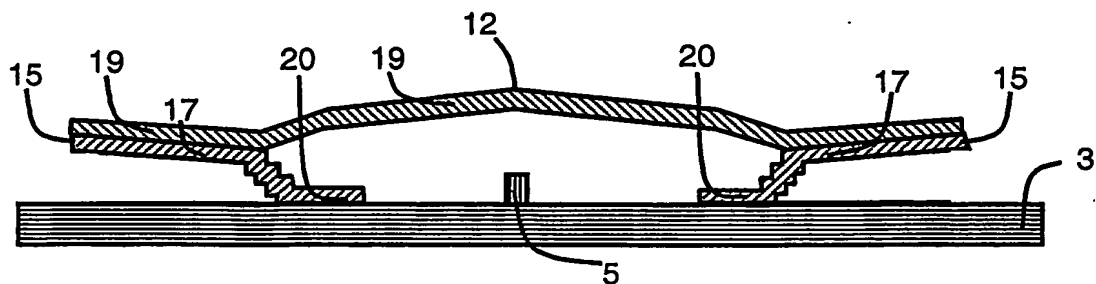


Figure 16